

# 特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会

## T2K長基線ニュートリノ振動実験における INGRID検出器を用いた ニュートリノイベントの探索

大阪市立大学  
尾崎 称

1. ニュートリノ振動とT2K実験の概要
2. INGRID検出器の概要
3. 検出器の性能評価
4. ビームデータ
5. まとめ

あるニュートリノが空間を伝搬中、異なる種類のニュートリノに振動する現象。  
3種類のニュートリノは、質量の固有状態の混合状態になっている。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

★ 振動確率(2成分の場合)

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( 1.27 \cdot \Delta m^2 [eV^2] \cdot \frac{L [km]}{E [GeV]} \right)$$

L: 飛行距離

E: エネルギー

$\theta$ : 混合角

$\Delta m^2$ : 質量自乗差

★ 既知の振動パラメータ

・ 太陽ニュートリノ、カムランド実験から

$$\Delta m_{12}^2 = 8 \times 10^{-5} eV^2, \quad \sin^2 2\theta_{12} = 0.86$$

・ 大気、加速器実験から

$$\Delta m_{23}^2 = 2.1 \sim 2.7 \times 10^{-3} eV^2, \quad \sin^2 2\theta_{23} > 0.92$$

・ 原子炉実験から

$$\sin^2 2\theta_{13} < 0.14$$

$\theta_{12}$ :  $\nu_e$ と $\nu_\mu$ の混合角

$\theta_{23}$ :  $\nu_\mu$ と $\nu_\tau$ の混合角

$\theta_{13}$ :  $\nu_e$ と $\nu_\tau$ の混合角

# T2K(Tokai to Kamioka)長基線ニュートリノ振動実験



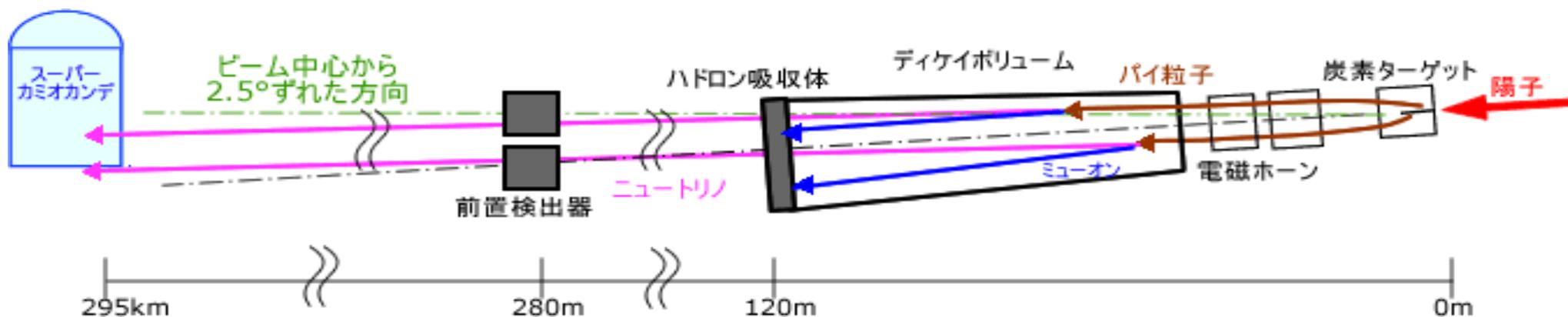
## 主な目的

- 未発見の振動モード( $\nu_e$  appearance)の発見、ならびに $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定
- $\nu_\mu$  disappearance による  $\sin^2 2\theta_{23}$ ,  $\Delta m^2_{23}$  の精密測定

## 特徴

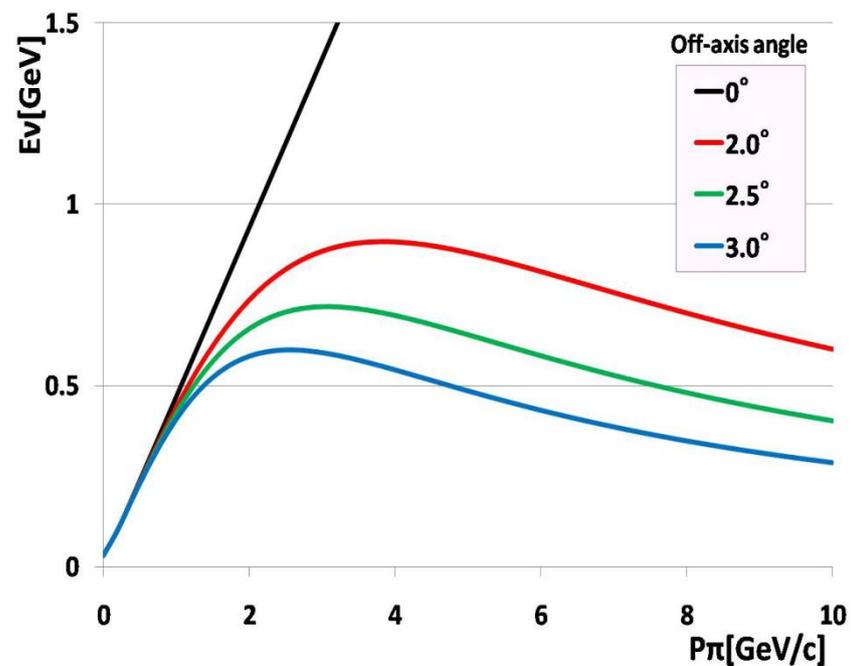
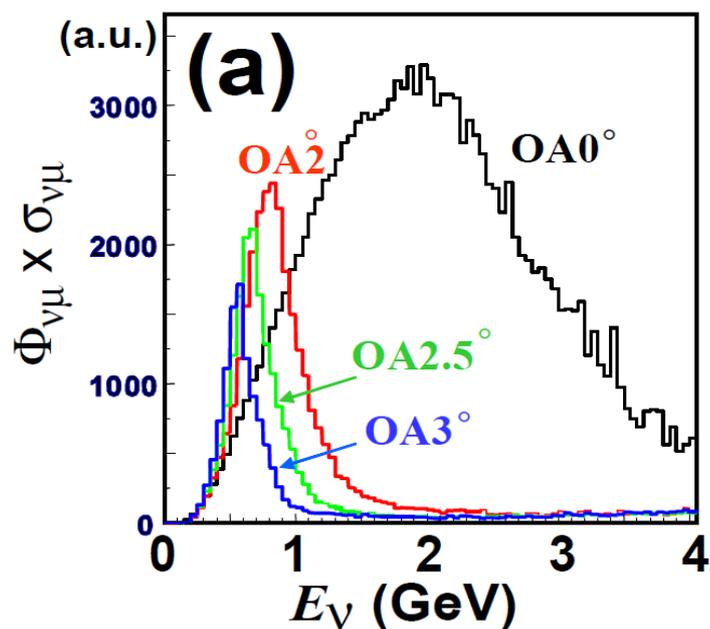
- 30GeV陽子シンクロトロンを用いた大強度ニュートリノビーム
- 5万トンの大型水チェレンコフ光検出装置スーパーカミオカンデ
- off-axisビーム

# T2K実験セットアップ



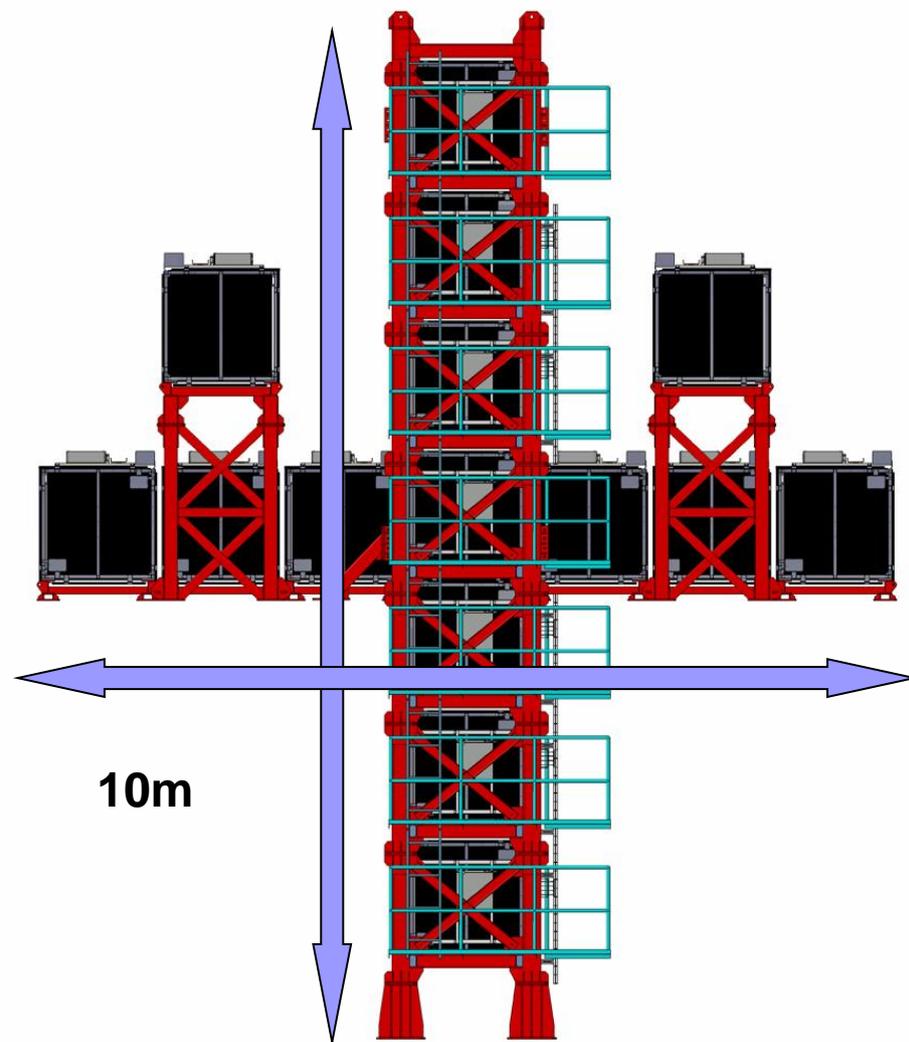
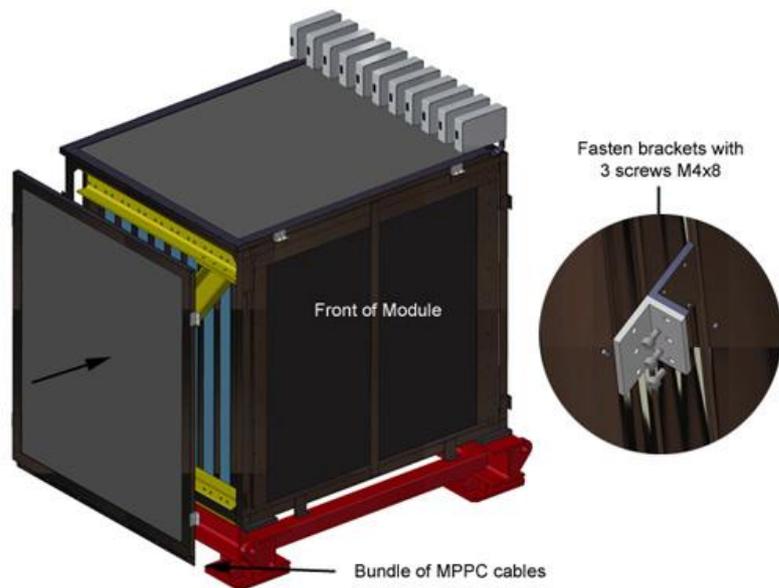
## off-axisビームの利用

ビーム中心をスーパーカミオカンデより2.5° ずらすことでモノクロビームを作り、振動確率が最大になるようにニュートリノビームエネルギーを合わせる手法



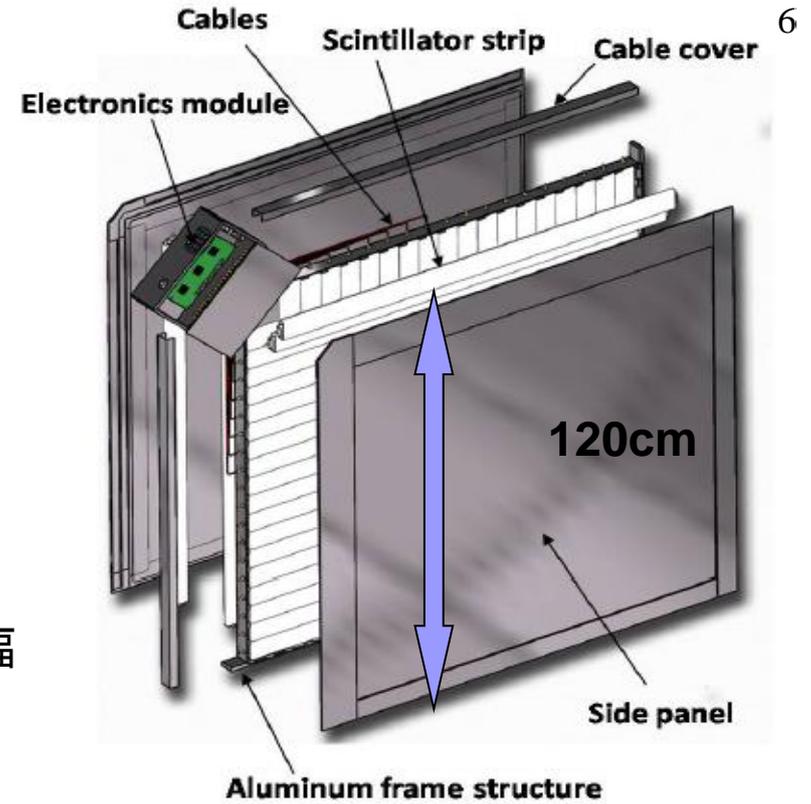
# ニュートリノビームモニター: INGRID (Interactive Neutrino GRID)

- 各モジュールのニュートリノ数分布からビーム方向とニュートリノの量を監視する。
- 荷電カレント準弾性散乱 (CCQE 反応):  $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$   
を利用して生成されるミューオンの飛跡を観測する。
- トラッキングプレーン11枚 + VETOプレーン3〜4枚 + 鉄9枚で1モジュールとする。  
(1モジュール = 約8トン)
- INGRIDはトラッキングプレーンと鉄標的のサンドウィッチ構造になっている。
- 横型モジュール、縦型モジュール各7個、  
第1, 第2象限に各1個 (未インストール)

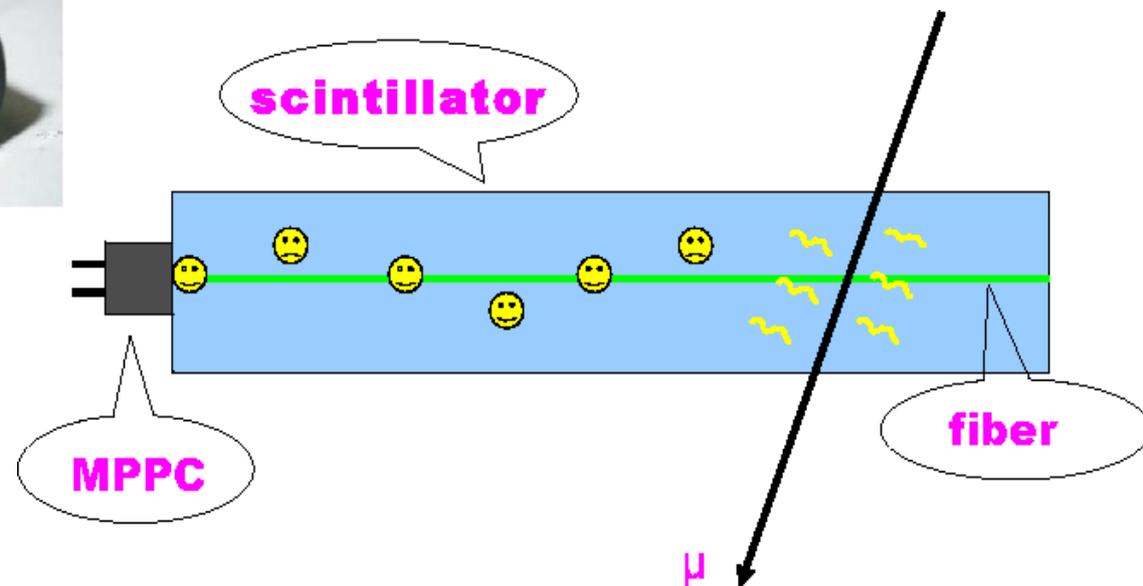


## トラッキングプレーンの内部構造

- 互いに垂直な2層のシンチレーター層  
各24ch、計48ch
- INGRID全体では、  
16モジュール×11プレーン×48ch=8448ch
- シンチレーター:発光
- 波長変換ファイバー:波長の最適化
- MPPC(Multi Pixel Photon Counter):増幅  
(GOMIコネクタ、PCB基盤)

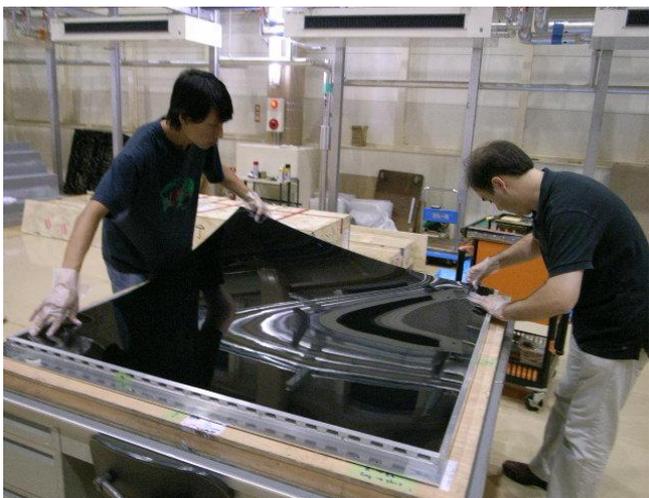


6



# トラッキングプレートの製作

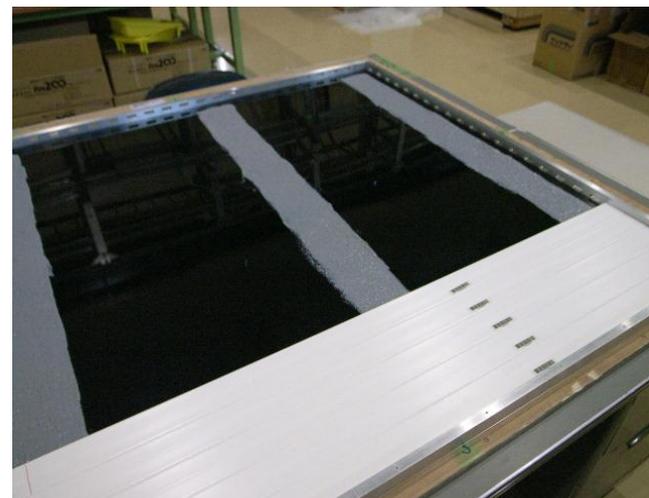
2008年8～12月にかけてトラッキングプレート全176枚の製作作業が行われた。  
以下、製作のおおまかな流れ



フレームの組み立て



接着剤の混合



シンチレーター1層目



シンチレーター2層目



硬化



ファイバーの挿入 & ケーブリング

トラッキングプレーンを4枚に重ね、4時間分の宇宙線データを取得

- ➔ 光量の低いチャンネル、信号の見えないチャンネルの交換
- ➔ 検出効率の測定

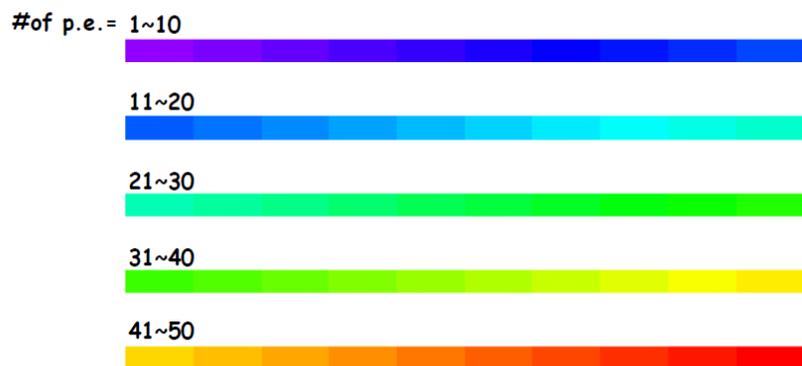
## 宇宙線イベントディスプレイ

右図のセルの色は光量に対応。

0~5p.e.: white

over 50p.e.: red

6~49p.e.: Color Code

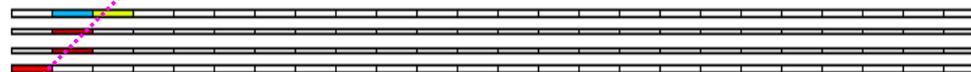


X layer



$\mu$

Y layer



## 光量分布

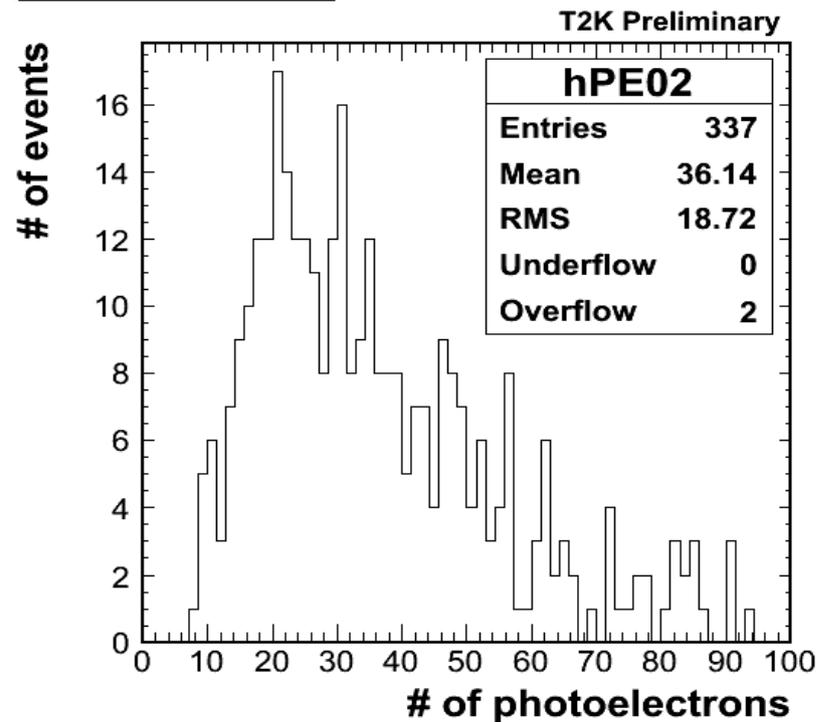
典型的な光量分布(上図)と問題のあるチャンネル(下図)の光量分布

### バッドチャンネルの原因

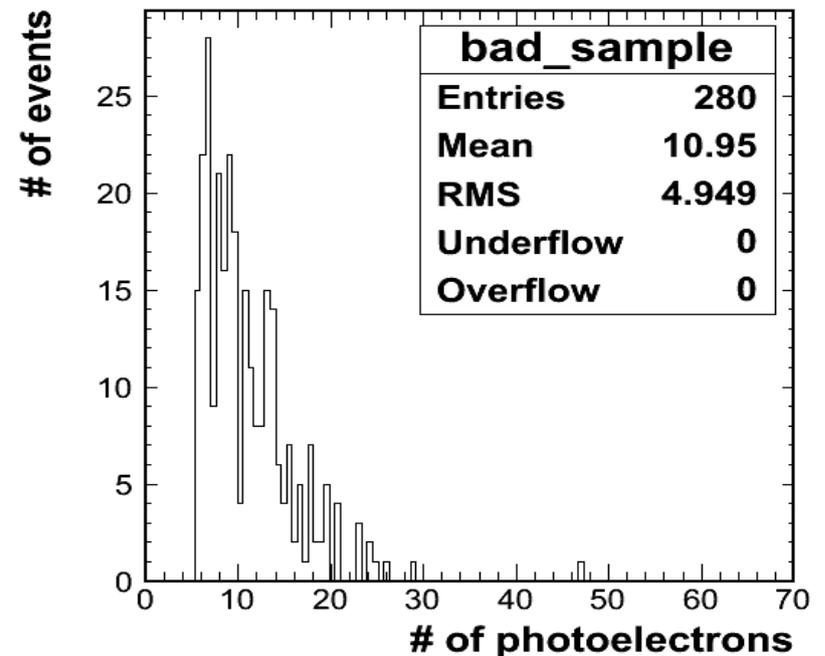
- ファイバーに由来するもの(21ch)
  - 断面の研磨不足および反射材の塗布不足、ファイバー表面の傷、GOMI コネクタの根本で折れている
- その他(2ch)
  - MPPC受光面の汚れ、ケーブル接続ミス

全チャンネルの修理が完了

### Photoelectrons



### Bad sample



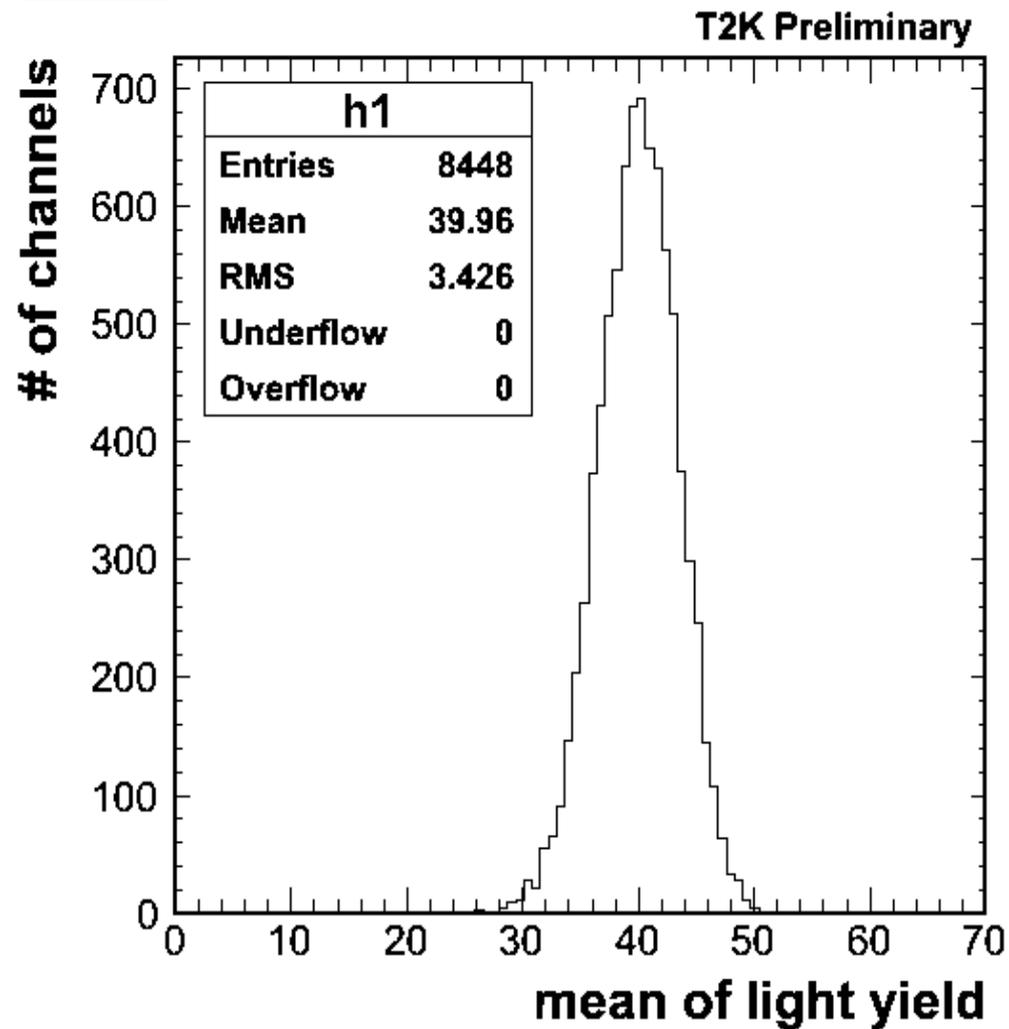
## 平均光量分布

- ・ トラッキングプレーン全8448ch分の平均光量=40.0p.e.
- ・ 最低光量は25.9p.e.

Mode3.Page3 (cr2)

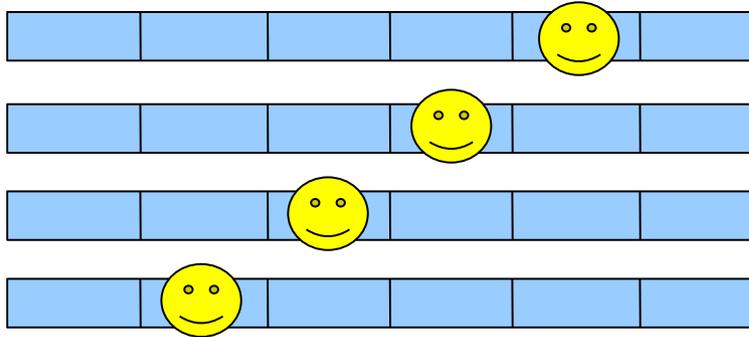
Fri Sep 18 17:16:31 2009

mean

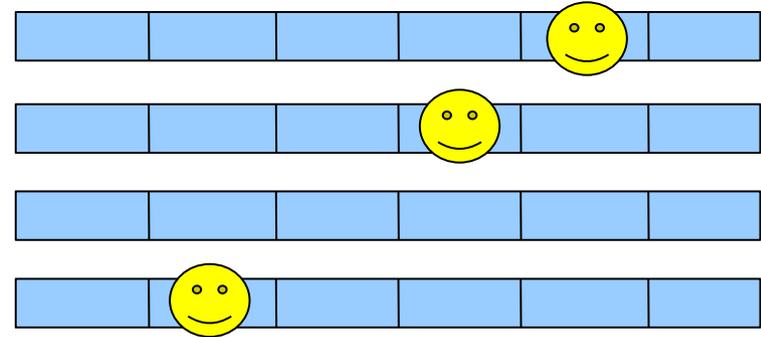


## 検出効率

宇宙線イベントとミスイベントから、検出効率を求めた。  
ミスイベントとは、上下の層のチャンネルが光っても、真ん中の層の光るべきチャンネルが光らないイベントのことである。



宇宙線イベント

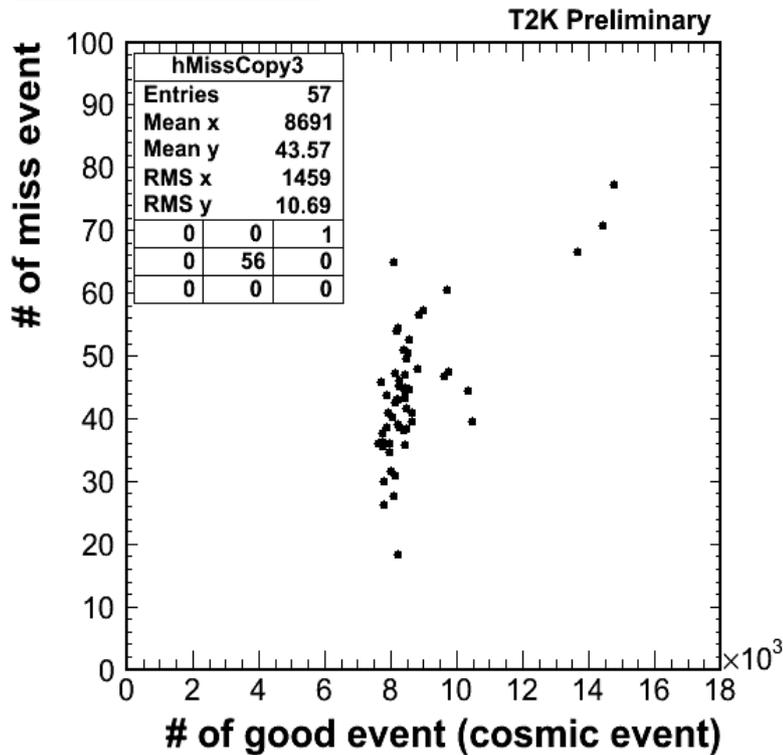


ミスイベント

Mode4.Page1 (cr2)

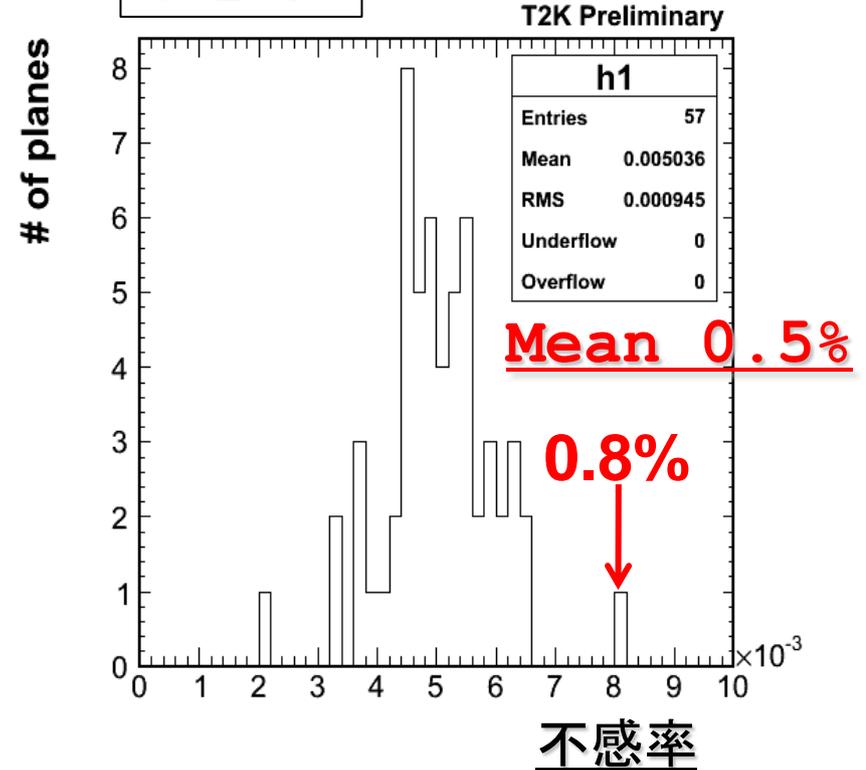
Mon Sep 28 18:20:21 2009

## Miss vs. Cosmic

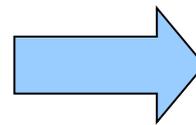


Wed Oct 21 16:00:50 2009

## 不感率



$$\text{不感率} = \frac{\text{ミスイベント数}}{\text{宇宙線イベント数}}$$



不感率は 平均0.5%、最低0.8%

## モジュールの製作およびインストール

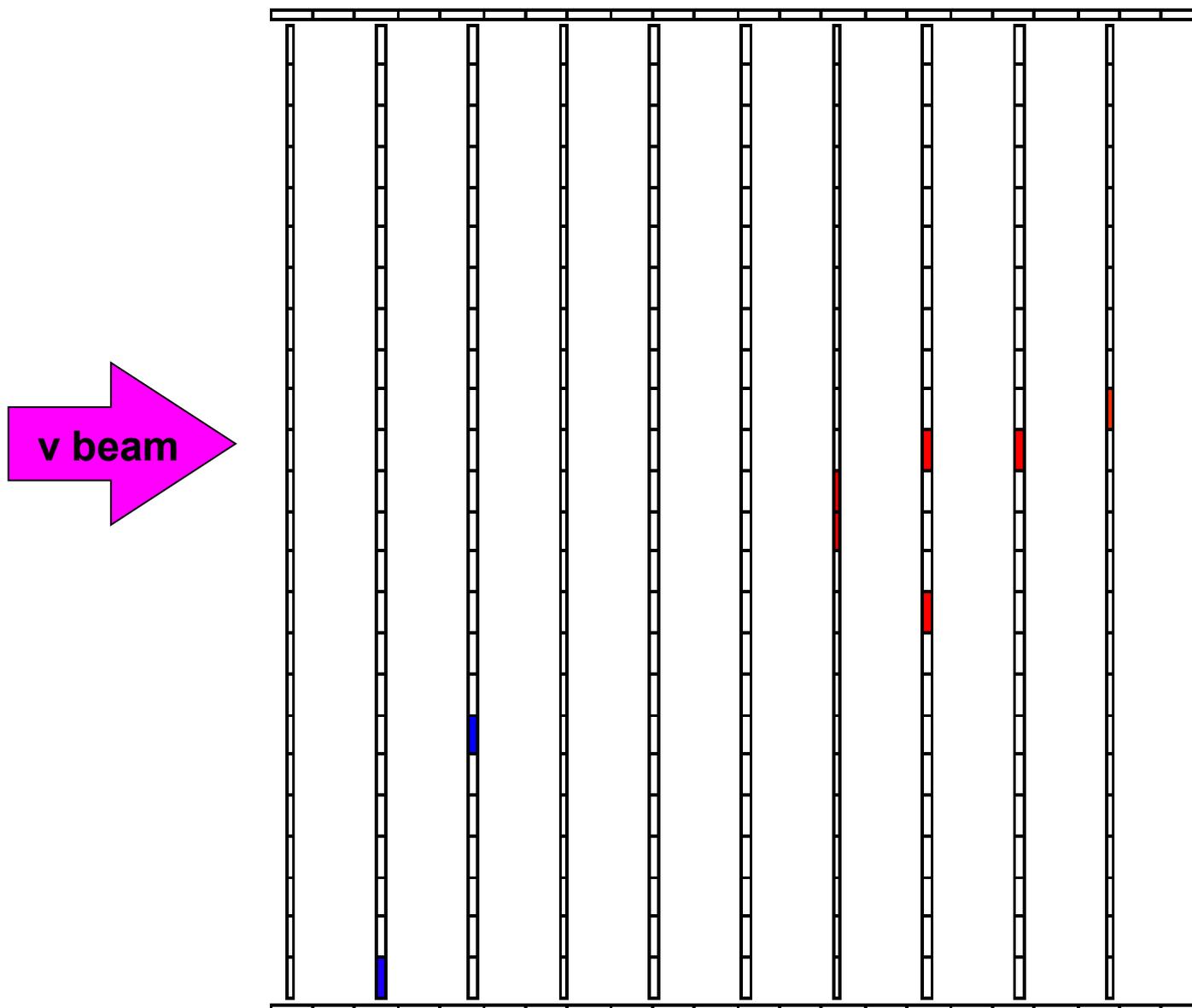
- 2009年2～3月にかけて、1stモジュールの製作およびインストールが完了。
- 6～8月にかけて残りの13モジュールの製作およびインストールが完了。



## ニュートリノイベントの初検出

11月のコミッショニング時に、ニュートリノの初検出に成功した。

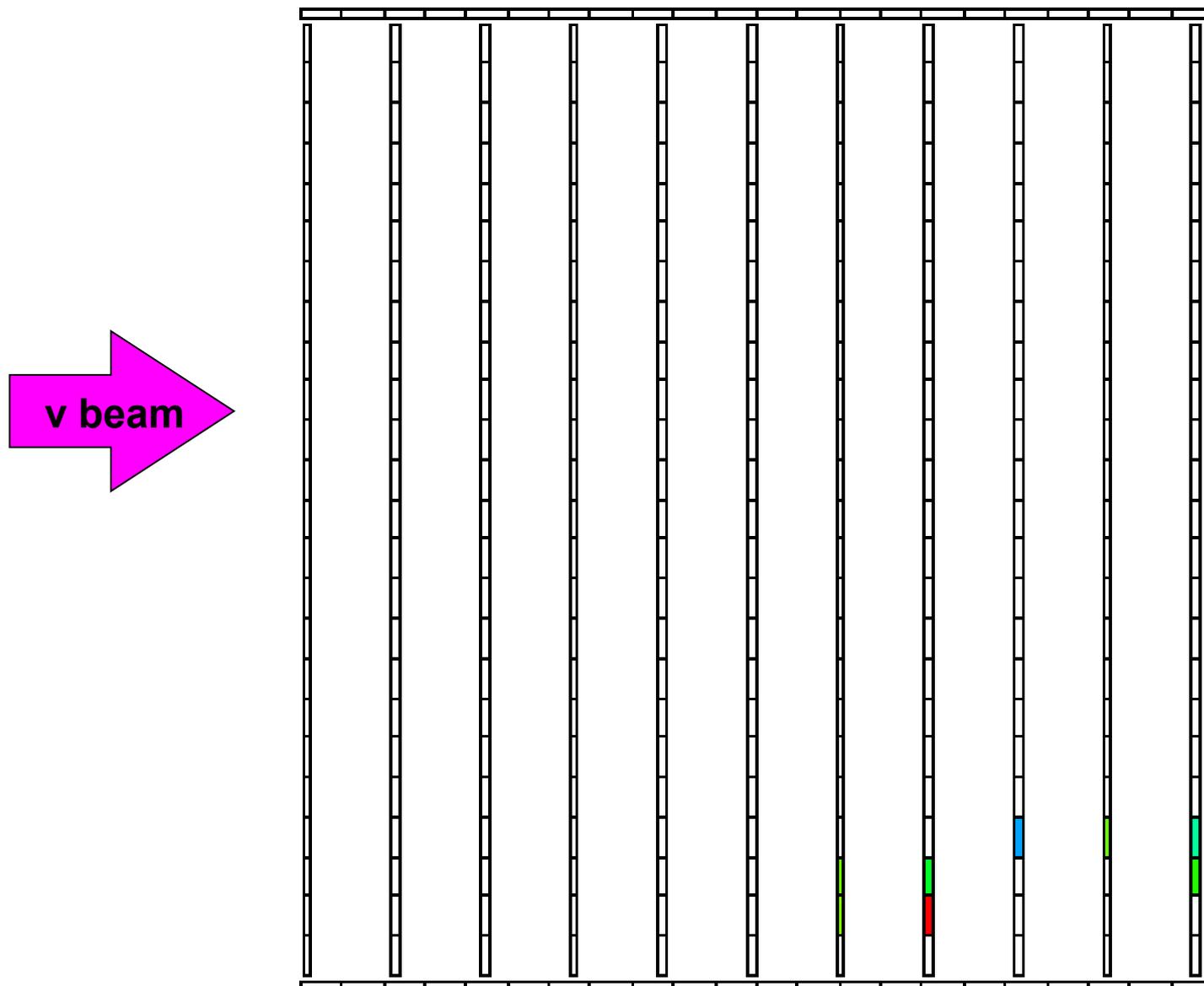
Side View (X layer)



## ニュートリノイベントの初検出

11月のコミッショニング時に、ニュートリノの初検出に成功した。

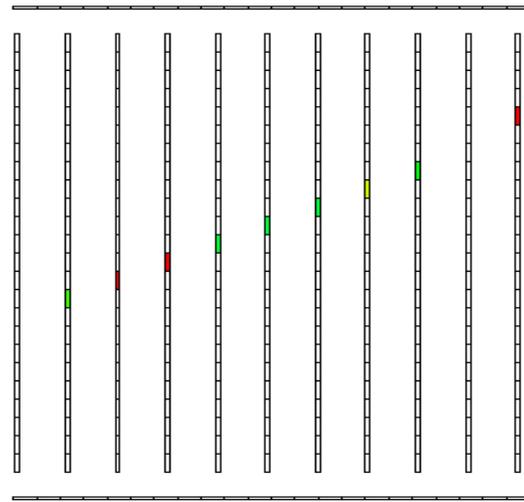
Top View (Y layer)



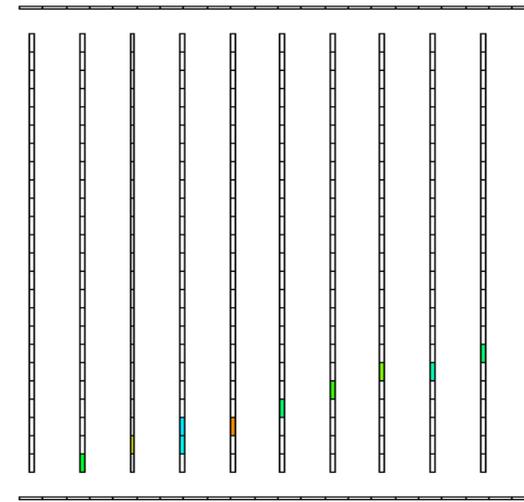
# トラック検出

Hough変換を利用して直線を検出する。

Side View (X layer)

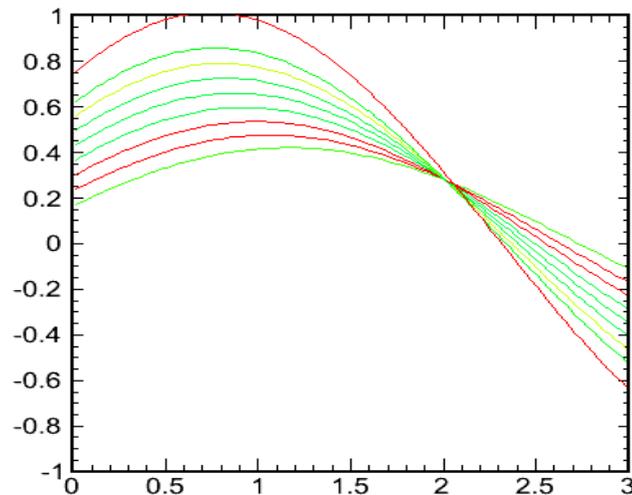


Top View (Y layer)

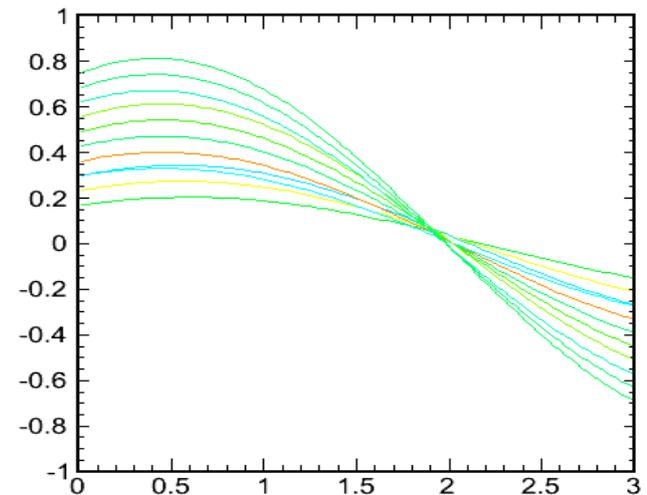


Hough変換

curve



curve



その後交点の有無を自動で検出するため、画像をデジタル化し密度の高いビンとして判別する。(研究中)

原点から各点までの距離を $r$ ,なす角を $\theta$ とした場合、

$$r(\theta) = x \cos \theta + y \sin \theta$$

が成り立つ。 $r$ を $\theta$ の関数としてグラフに表すと、下図のようになる。

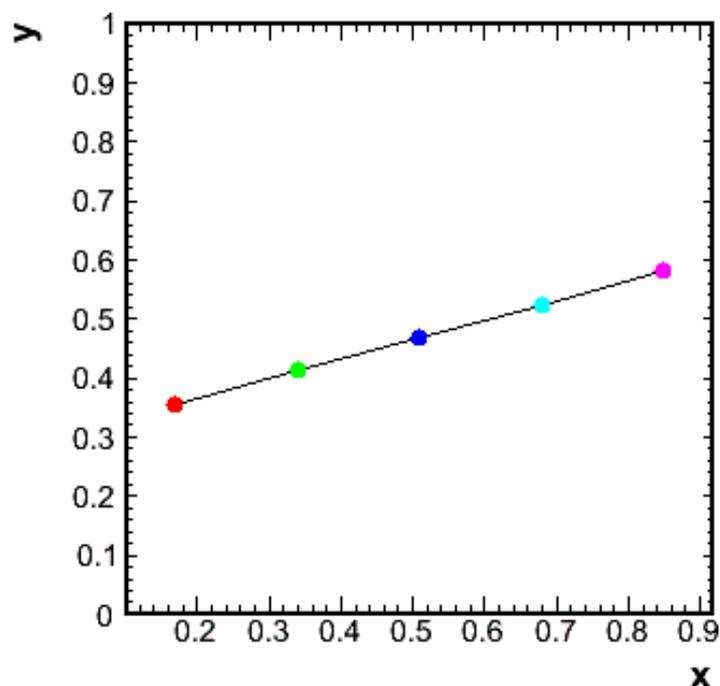
5つの曲線の交点座標 $(r, \theta)$ は、5点を結ぶ 直線までの原点からの距離となす角を表す。

反応のあったセルの座標を調べて、各座標を

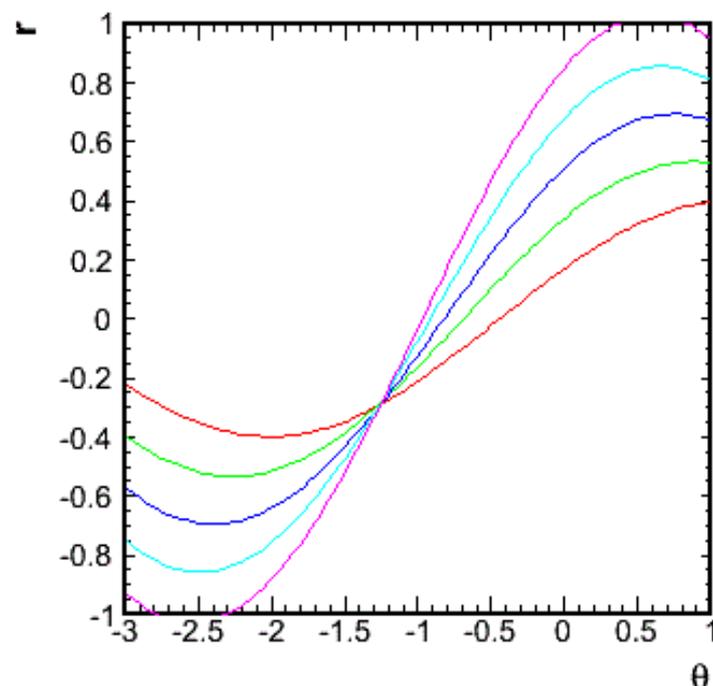
$$[x] \cos \theta + [y] \sin \theta$$

に代入して曲線を表示させる。

Graph



curve



- 2008年8月から現在までの間、シンチレータープレーンの製作、性能評価、モジュールの製作、インストールを行った。
- 現在ビームコミッショニング中
- 2010年3月より物理ラン開始予定
  
- トラッキングプレーン全チャンネルの平均光量は40.0p.e., 最低平均光量は25.9p.e.
- INGRIDの検出効率は99.5%(全シンチレータ層の検出効率 $\geq$ 99.2%)
  
- モジュールインストール後、ニュートリノイベントの検出に成功
  
- Hough変換を利用したニュートリノイベント探索を目指す

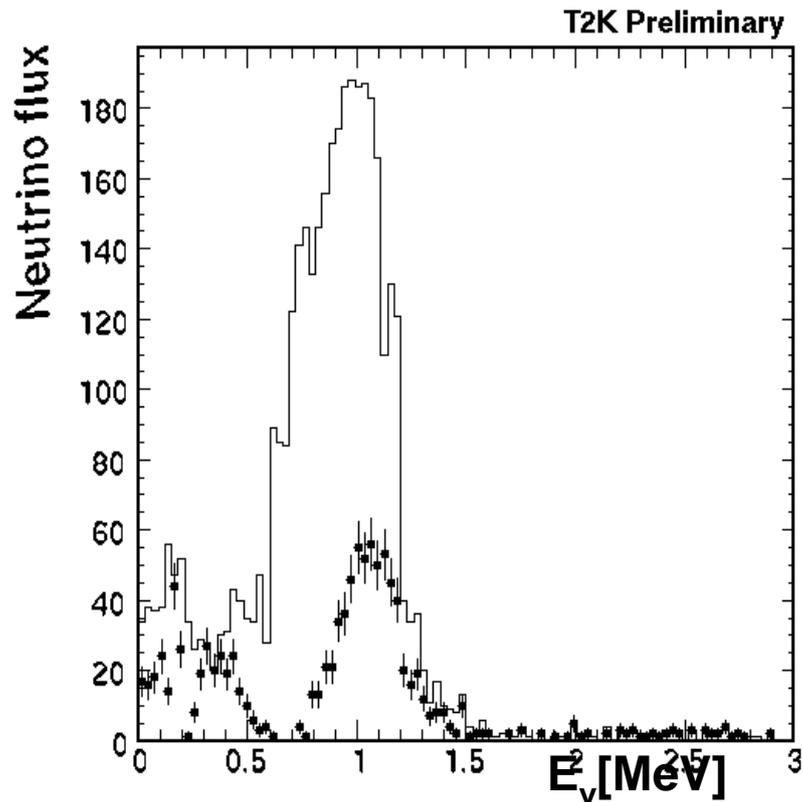
Back Up

# Monte Carlo Simulation of T2K

- (left) input and oscillated flux
- (right) ratio and fitting  
Parameters are  $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1, 0.0028)$ .

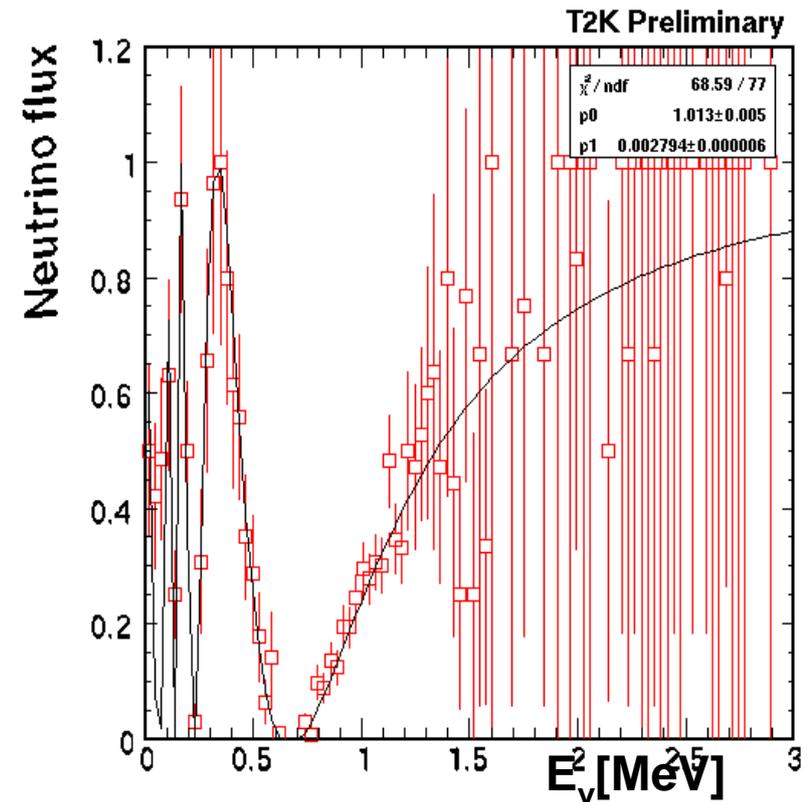
Mode4.Page3 (anal)

Thu Apr 16 20:31:30 2009



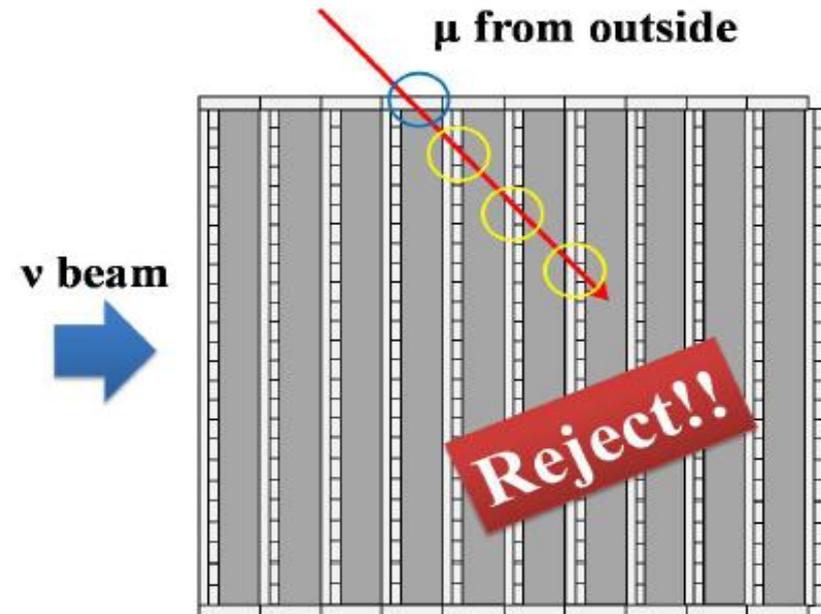
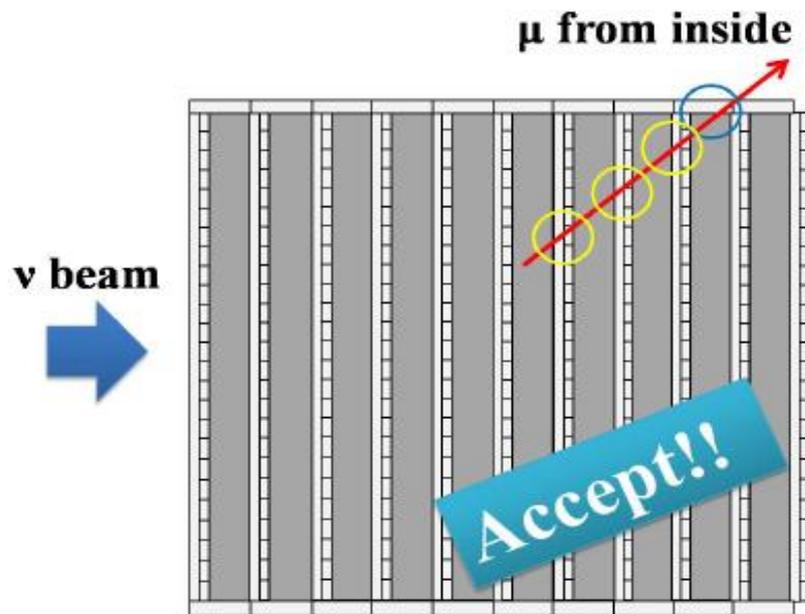
Mode4.Page4 (anal)

Thu Apr 16 20:32:54 2009



# VETOプレーンカット

CCQE反応 :  $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$

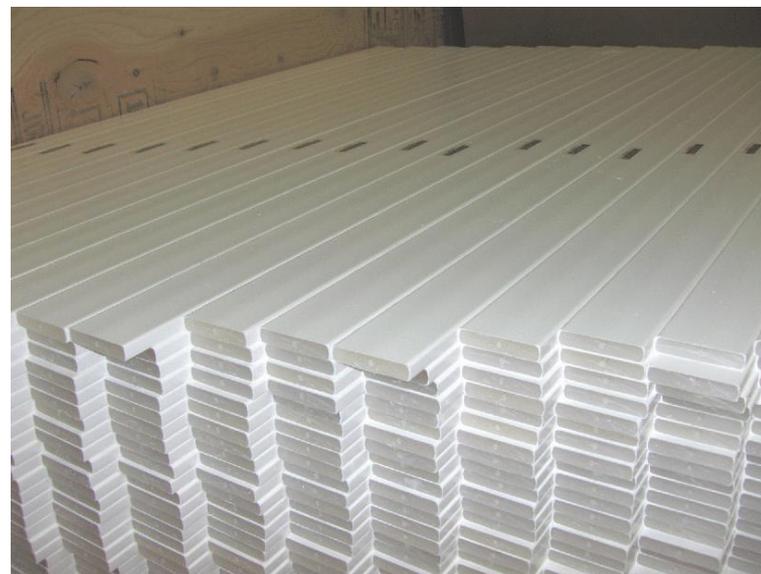


## 原理

シンチレーターに荷電粒子が入射すると、エネルギーをプラスチック中の電子に渡す。その振動エネルギーの一部が光として放出され、シンチレーション光(紫外線)となる。プラスチックに蛍光物質を混ぜておくと、シンチレーション光はそれらに吸収されて青や緑の光を出す。

## 特徴

- ・ 押し出し型プラスチックシンチレーター 1×5×120cm 600g
- ・ ポリスチレン+PPO(1%)+POPOP(0.01%)
- ・ 発光波長のピーク=425nm



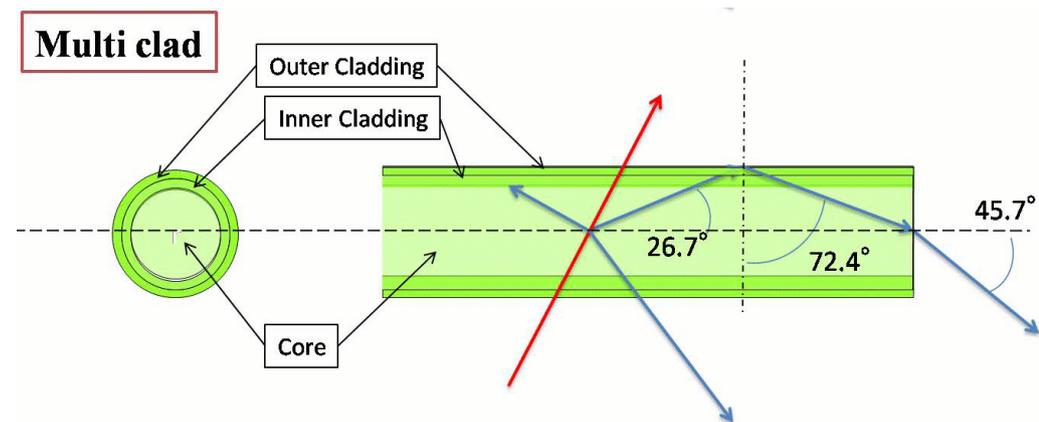
# 波長変換ファイバー

## 原理

通常、光ファイバーに側面から入ってきた光は全反射条件を満たすことができないため、そのまま外部にでて行く。よってその光を伝送することはできない。波長変換ファイバーは、中心に波長変換材(□ある波長領域の光を吸収してそれより長い波長領域の光を等方的に再発光する物質□)が混ぜ込まれているので、再発光された光のうち全反射条件を満たすものはファイバーの中を伝搬することができる。

## 特徴

- ・ Y-11(200)MS
- ・ 吸収波長のピーク=420nm
- ・ 発光波長のピーク=450nm
- ・ この波長領域におけるMPPCの量子効率〜70%

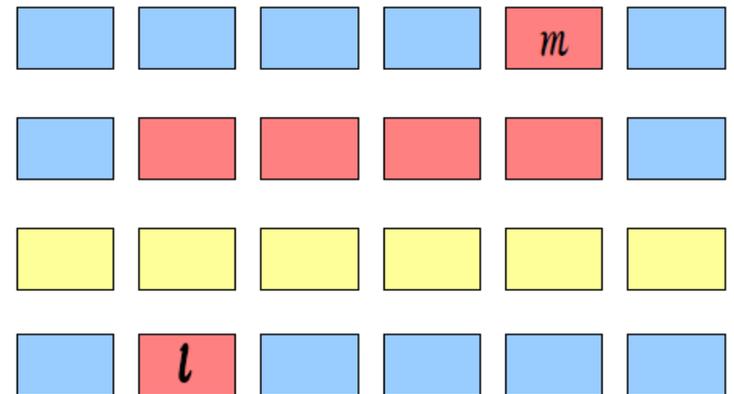


## 検出効率の測定におけるイベントセレクション

- 宇宙線試験で合格したプレーンが真ん中になが存在した場合のみ、検出効率を求める
- 解析の結果、176プレーン中57プレーンが該当

### イベントセレクション

- 着目している層以外の7層にそれぞれ1chずつのヒット(9.5p.e.以上)を要求する。
- TPL0, 3の、自身と同じ方向の層において、hitを要求。hit ch.を1, m とする。
- 真ん中2つの層のうち、着目していない方の層において、 $1 \leq \text{hit}(n) \leq m$  があれば、**Cosmic event** と定義。
- 着目する層において、 $1 \leq \text{hit} \leq n$  があれば hit event, なければ **miss event** とする。



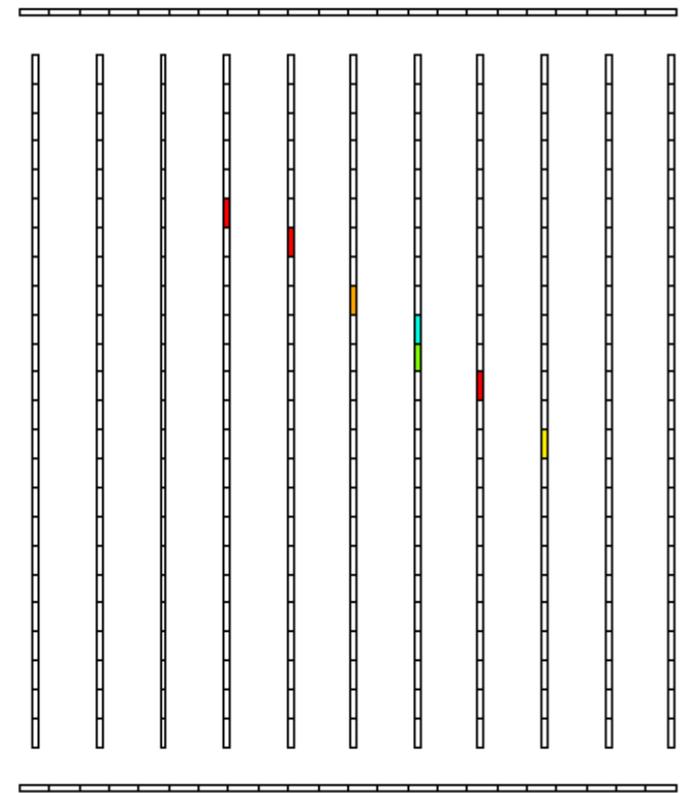
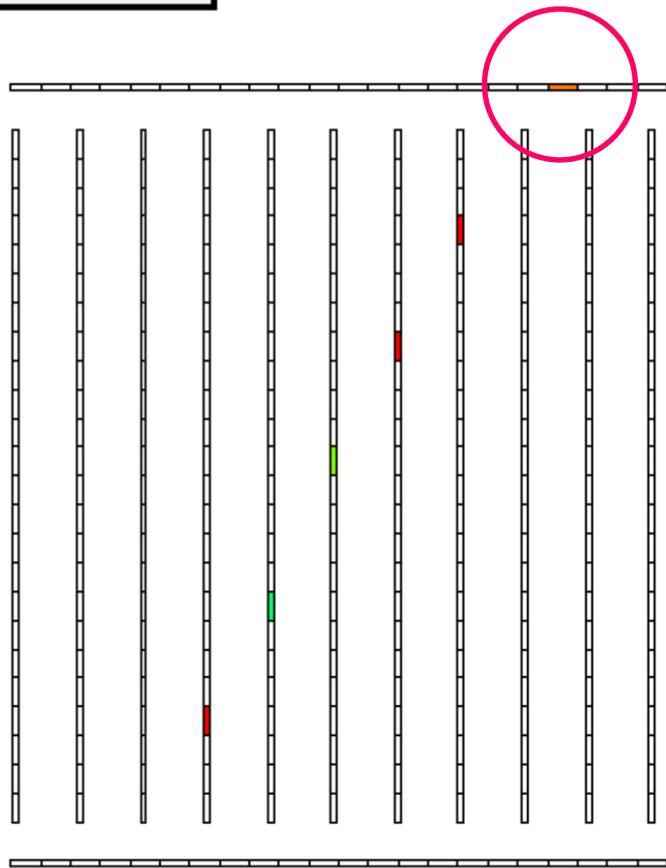
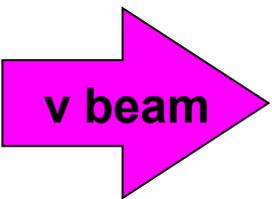
不感率は miss ev./cosmic ev. として求める。

# ニュートリノイベント(2)

## INGRIDイベント

Side View (X layer)

Top View (Y layer)

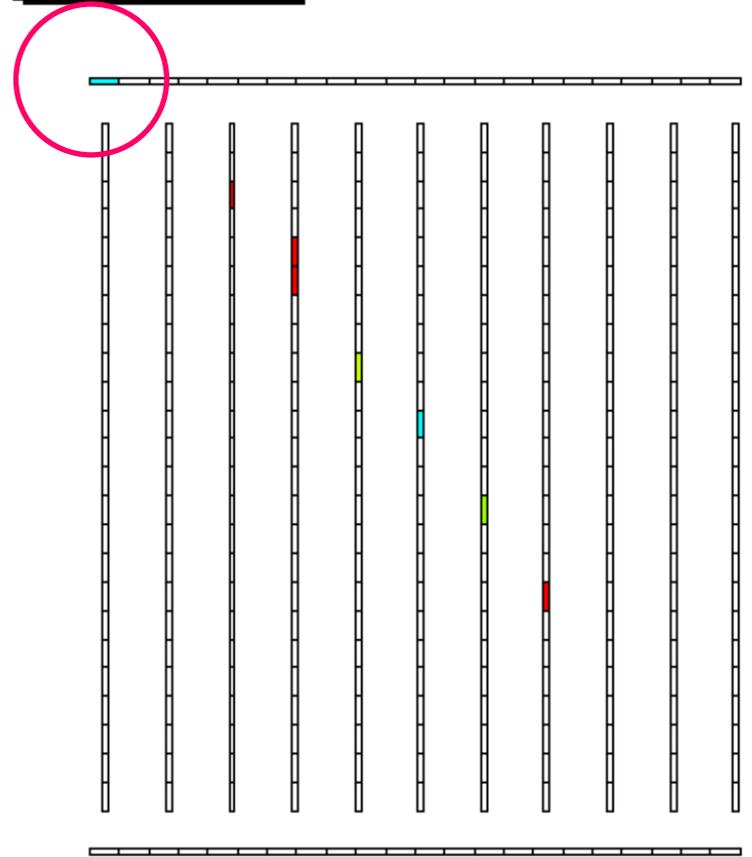
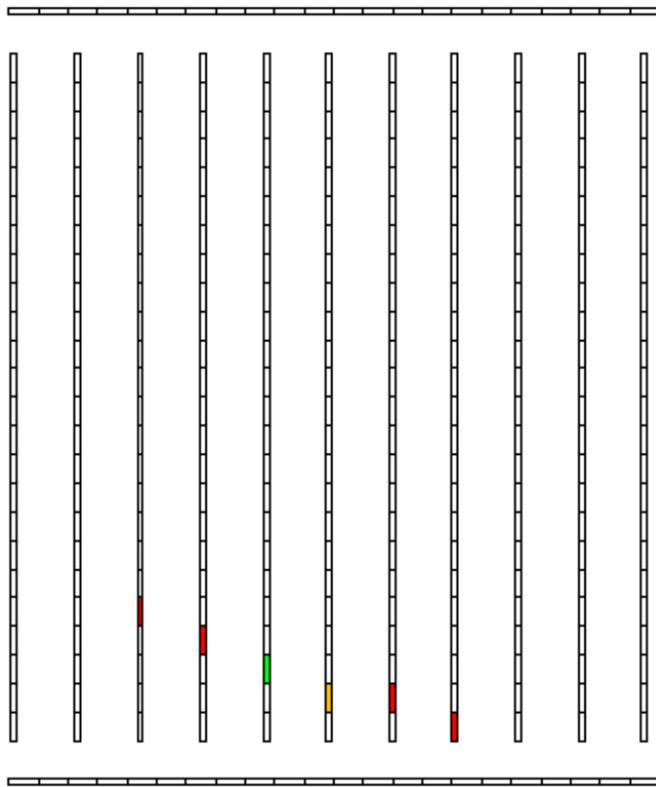
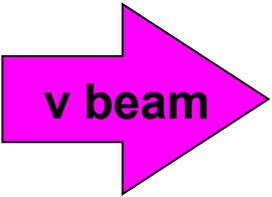


# ニュートリノイベント(3)

## バックグラウンドイベント

Side View (X layer)

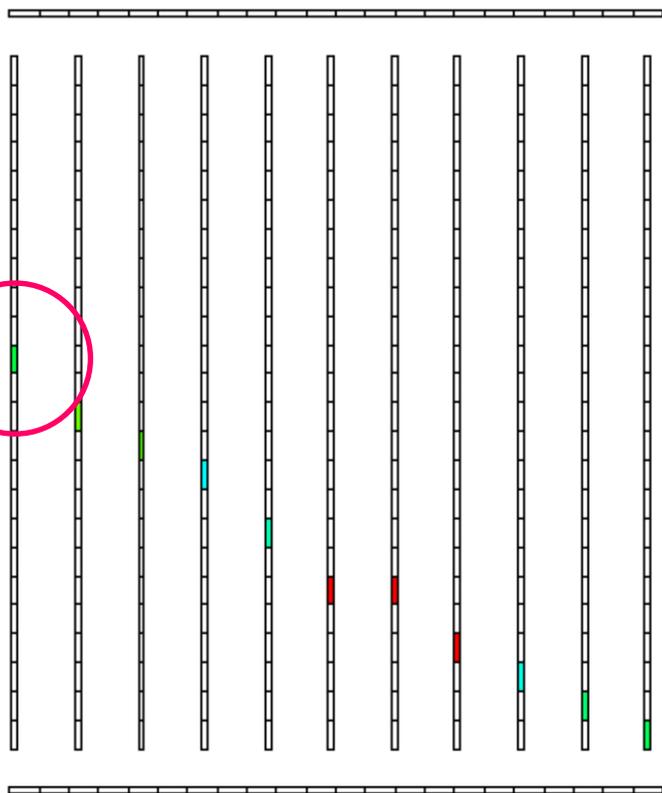
Top View (Y layer)



# ニュートリノイベント(4)

## バックグラウンドイベント

Side View (X layer)



Top View (Y layer)

